

Seevermessung mal anders

Zehn Tage Schweremessungen mit dem VWFS *Deneb* auf der Nordsee im Juni und Juli 2021

Ein Beitrag von GUNTER LIEBSCH, PATRICK WESTFELD, CHRISTOPH FÖRSTE, LUDWIG SCHRÖDER, JOACHIM SCHWABE, TOBIAS PETER BAUER und NICO STOLARCZUK

Wer Höhen mit globalen Navigationssatellitensystemen bestimmen will, benötigt eine Höhenbezugsfläche. In Deutschland ist die Höhenbezugsfläche das German Combined Quasigeoid (GCG). Diese wurde nun für die Nordsee neu bestimmt. Dazu wurden Schweremessungen durchgeführt. Wie die Messungen abliefen und was es dabei zu beachten gab, erklären die beteiligten Wissenschaftler.

Schwerefeld | German Combined Quasigeoid | Seekartennull | Satellitenaltimetrie | BSCD2000
gravity field | German Combined Quasigeoid | chart datum | satellite altimetry | BSCD2000

Anyone who wants to determine heights with global navigation satellite systems needs a height reference surface. In Germany, the height reference surface is the German Combined Quasigeoid (GCG). This has now been newly determined for the North Sea. Gravity measurements were carried out for this purpose. The scientists involved explain how the measurements were carried out and what had to be taken into account.

Autoren

Dr. Gunter Liebsch, Dr. Ludwig Schröder, Dr. Joachim Schwabe und Tobias Peter Bauer arbeiten beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Leipzig.
Dr. Patrick Westfeld arbeitet beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock.
Dr. Christoph Förste und Nico Stolarczuk arbeiten am Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

gunter.liebsch@bkg.bund.de

Leinen los!

Dienstag, 29. Juni 2021, 10:00 Uhr. Wir legen ab und werden mit dem Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff (VWFS) *Deneb* (Abb. 1) in den nächsten zehn Tagen das Schwerefeld der Nordsee vermessen. Mit der schiffsgestützten Durchführung von Schweremessungen haben wir erstmals 2013 in der Ostsee begonnen (Schäfer et al. 2013; Lu et al. 2019). Mittlerweile ist dies nun schon die sechste Messkampagne. Die gravimetrische Neuvermessung in der südlichen Ostsee (BKG/GFZ/BSH 2016) bis an die schwedische Küste, Bornholm und in die polnischen Gewässer hinein konnten wir 2018 erfolgreich abschließen (Lu et al. 2019). Ein Großteil unserer Arbeiten wurde durch die Europäische Kommission im Rahmen des Projektes »Finalising Surveys for the Baltic Motorways of the Sea« (FAMOS, www.famosproject.eu) kofinanziert. Wir, das sind:

- das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), das die Schiffe bereitstellt,
- Kollegen vom Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), die das Gravimeter an Bord des Schiffes betreiben und die Schwerewerte berechnen,
- die TU Darmstadt, deren Institut für Geodäsie seit 2017 ein weiteres inertiales Messgerät für die Bestimmung der Schwerewerte an Bord betreibt, und
- das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), das die Fahrt initiiert und geplant hat und anhand der Schwerewerte die Höhenbezugsfläche für Deutschland berechnet.

Die Höhenbezugsfläche von Deutschland hat die offizielle Bezeichnung »German Combined Quasigeoid« (GCG), ist ein Gemeinschaftsprodukt des BKG und der Länder und wird vom Dienstleistungszentrum des BKG vertrieben. Sie legt praktisch das Nullniveau für die Höhenbestimmung in Deutschland fest und wird von allen gebraucht, die Höhen im amtlichen Höhensystem mit Hilfe der globalen Satellitennavigationssysteme (GPS, Galileo, Glonass, Beidou), z. B. unter Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung SAPOS, bestimmen wollen. Und das sind nicht wenige. Das Nutzersegment geht weit über die klassische Vermessungsklientel hinaus und reicht bis zu Energieversorgern, der Deutschen Bahn, der Landwirtschaft usw.

In der Ostsee legt das GCG gleichzeitig das sogenannte Seekartennull (SKN; §4 Absatz 4 Satz 3 TR BGeoRG; Schwabe et al. 2020) fest. Alle Tiefenangaben in den Seekarten des BSH sind auf dieses Modell bezogen. In der Nordsee müssen vom BSH zusätzlich die Gezeiten berücksichtigt werden. Das Seekartennull wird hier entsprechend den internationalen Standards durch das niedrigste Niedrigwasser festgelegt (Lowest Astronomical Tide, LAT; §4 Absatz 4 Satz 2 TR BGeoRG; IHO 2018), sodass die Nautiker auf den Schiffen die Tiefenangabe der Seekarte quasi als eine Art Mindestmaß für den vorhandenen Wasserstand ansehen und mit der Kenntnis des Tiefganges ihres Schiffes sicher navigieren können. Dieses gemeinsame Interesse an dem Ergebnis hat auch zur langjährigen erfolgreichen, vertrauensvollen und unkomplizierten

Zusammenarbeit zwischen den Partnern beigetragen.

Arbeiten in der Nordsee hat das BKG bereits zwischen 2014 und 2016 durchgeführt (BKG 2015). Damals wurden wir durch die jeweiligen Landesämter für Küsten- und Naturschutz (LKN.SH, NLWKN), Geoinformation und Vermessung in Schleswig-Holstein und Niedersachsen (LVermGeo SH, LGLN), die Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) Bremen und Wilhelmshaven sowie Bewohner der Insel Neuwerk logistisch bei der Durchführung von Schweremessungen in den Wattgebieten sowie entlang der schleswig-holsteinischen Küste unterstützt.

Diesmal wollen wir an diese Messungen anschließen und große Teile der Ausschließlichen Wirtschaftszone Deutschlands (AWZ) in der Nordsee vermessen (Abb. 2). Die neu gewonnenen Daten helfen dabei, ältere ungenaue Datensätze zu überprüfen bzw. diese zu ersetzen. Älter bedeutet hier 40 bis 50 Jahre (Abb. 3). Insofern können unsere Messungen als ein Aspekt des geodätischen Qualitätsmanagements angesehen werden. Ohne eine gute und valide Datengrundlage lässt sich kein genaues Modell ableiten. Im konkreten Fall trägt dieses Modell immerhin zur Sicherheit der Schifffahrt bei und leistet damit auch einen Beitrag zu Transportwirtschaft und Umweltschutz. »Blue Growth« (oder »Blue Economy«) und »Küstenzonenmanagement« sind Schlagworte dafür im politischen Umfeld. Wie so häufig in der Geodäsie werden solche infrastrukturellen Grundlagen vielfach als selbstverständlich vorausgesetzt, auch wenn – wie in diesem Fall – langjährige und kontinuierliche Arbeit dahintersteckt. Wenn man so will, sind die geodätischen Grundlagenarbeiten eben sogar die Infrastruktur hinter der Infrastruktur.

Nachdem die bereits für das letzte Jahr geplanten Messungen pandemiebedingt abgesagt werden mussten, war es auch in diesem Jahr lange Zeit fraglich, ob die schon im letzten Jahr reservierte Schiffszeit genutzt werden kann. Die unmittelbaren Vorbereitungen wurden deshalb erst nach Ostern begonnen, dafür aber umso intensiver. Nichts Besonderes, sollte man denken. Aber auch für uns gehen diese Arbeiten über die tägliche Routine hinaus. Seit der letzten Fahrt haben außerdem sowohl am GFZ als auch am BKG einige neue Kollegen den Staffelstab von den älteren übernommen, die mittlerweile ihren verdienten Ruhestand genießen.

Was haben die Schweremessungen mit unserer Höhenbezugsfläche zu tun?

»Die Erdanziehungskraft gehört sicherlich nicht zu den Dingen, über die man sich im täglichen Leben besonders viele Gedanken macht. Begriffe wie oben, unten, hoch, runter, waagrecht und senk- bzw. lotrecht benutzen wir täglich und sind ganz selbstverständlich im Sprachgebrauch. Genauer



© Tobias Bauer, BKG

Abb. 1: Das VWFS Deneb im Hafen von Bremerhaven

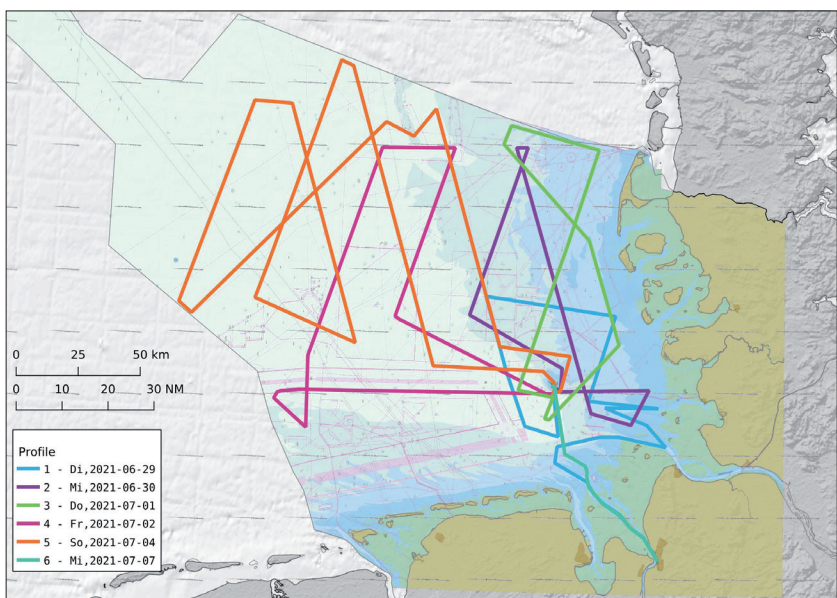


Abb. 2: Fahrtverlauf der Messkampagne 2021 mit dem VWFS Deneb

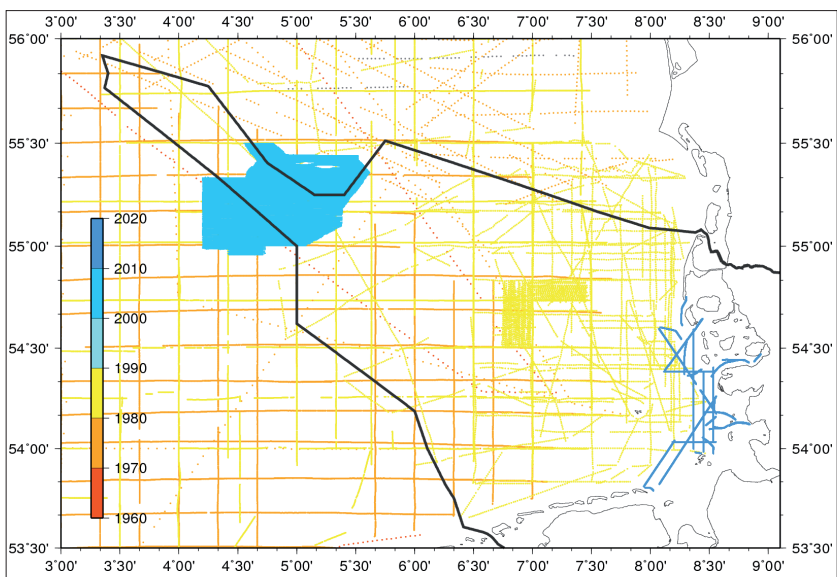


Abb. 3: Alter der Schweredaten im aktuellen Quasigeoidmodell GCG2016

betrachtet geben sie uns eine Richtung an, die vom Schwerfeld der Erde vorgegeben ist. Im Vergnügungspark fahren wir mit der Achterbahn und haben Spaß daran, in den Kurven mit »mehreren g« in die Sitze gepresst zu werden. Die Fallbeschleunigung g , mit der wir von der Erde festgehalten werden, verwenden wir hier als Vergleichsmaßstab. Wie groß ist nun die Schwerebeschleunigung und wie stark variiert sie?« (Fahrtbericht Deneb 2015).

Im Mittel beträgt die Schwerebeschleunigung der Erde g $9,81 \text{ m/s}^2$. Dieser Wert variiert in Meereshöhe aufgrund der Abplattung der Erde von ca. 22 km systematisch zwischen $9,78 \text{ m/s}^2$ am Äquator und $9,83 \text{ m/s}^2$ an den Polen und nimmt außerdem mit zunehmender Höhe ab. Das heißt, wir werden am Äquator und auf hohen Bergen weniger stark von Mutter Erde angezogen. Diese beiden Sachverhalte sind durch das Newtonsche Gravitationsgesetz erklärbar. Mit zunehmendem Abstand von der anziehenden Masse (der Erde) nimmt die Anziehungskraft quadratisch ab. Die unterschiedliche Schwerebeschleunigung führt dazu, dass eine Waage, die nicht für ihren jeweiligen Einsatzort kalibriert wird, am Äquator etwas weniger anzeigt als an den Polen. Bei einer Person mit einer Masse von 80 kg sind das immerhin rund 400 g.

Die Gezeiten der Meere sind ein interessantes Phänomen und bleiben sicherlich nicht nur einem Wattwanderer lebhaft in Erinnerung. Sie werden durch den Einfluss der Massen von Sonne und Mond verursacht. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass auch die Massenverteilung der Erde selbst einen großen, wenn auch nahezu unveränderlichen Einfluss auf die Form des Meeresspiegels haben muss.

Die durch die Abplattung der Erde bedingten Schwereunterschiede sind natürlich längst hinreichend genau bekannt. Bis zu einer räumlichen Auflösung von 100 km wurde das Erdschwerfeld in den letzten 20 Jahren zudem mit Hilfe verschiedener Satellitenmissionen sehr genau vermessen (Pail et al. 2011). Für die Feinstrukturen des Erdschwerfeldes sind die Satellitenmessungen aber nicht sensitiv genug. Und für die Bestimmung der Höhenbezugsfläche möchten wir es schon ziemlich genau wissen. Um unser Quasigeoidmodell in einem Gitterabstand von 1 km bereitstellen zu können, benutzen wir gegenwärtig Schwerewerte im Abstand von ca. 4 km in Verbindung mit Informationen aus digitalen Gelände- (DGM25; BKG 2018) bzw. Bathymetriemodellen (GEBCO; GEBCO Compilation Group 2021). In Gegenden mit besonders großen Schwereänderungen, wie im Gebirge, sollte die Dichte der Schweremessdaten zukünftig sogar noch höher liegen. Diese Feinstrukturen des Erdschwerfeldes können derzeit nur mit terrestrischen Messmethoden bestimmt werden, auch wenn diese Messungen durchaus langwierig und aufwendig sind. Im Festlandbereich haben die

Bundesländer in den letzten zehn Jahren bereits in vielen Bereichen neue Schweremessungen durchgeführt. Das BKG engagiert sich seit ca. 15 Jahren insbesondere in den logistisch schwerer zugänglichen Bereichen. Der Fokus unserer Arbeiten lag auf den Meeresbereichen, den Wattgebieten und den Alpen. Dabei haben wir mit Flugzeugen, Helikoptern, Schiffen, Amphibienfahrzeugen, Pferdefuhrwerken und natürlich Autos wohl fast alle denkbaren Fortbewegungsmittel bzw. Messplattformen für die Schweremessungen genutzt.

Für die Bestimmung unserer Höhenbezugsfläche benötigen wir nicht nur eine relativ hohe räumliche Dichte von Messpunkten, die Messungen selbst müssen auch sehr präzise sein. Auf die fünfte und möglichst sechste Nachkommastelle genau muss die Schwerebeschleunigung bekannt sein, um unsere Höhenbezugsfläche mit Subzentimetergenauigkeit berechnen zu können. Variationen des Schwerfeldes der Erde in dieser Größenordnung ergeben sich aufgrund unregelmäßiger Massenverteilungen und werden als Schwereanomalien bezeichnet. Unregelmäßige Massenverteilungen, das sind sowohl die Topographie (Berge und Täler) als auch die unterschiedliche Dichte der Gesteinsmaterialien im Erdinneren. Gebiete, in denen die Materialien der Erdkruste eine höhere Dichte aufweisen, bewirken eine höhere Erdanziehungskraft in dieser Gegend und umgekehrt. Geologen und Geophysiker nutzen die Kenntnis dieser Unregelmäßigkeiten des Erdschwerfeldes für die Erkundung und Untersuchung von Lagerstätten. Unsere Messungen allein würden für die Lagerstätten erkundung aber nicht ausreichen. Dazu müsste noch einmal viel dichter und unter Nutzung weiterer Verfahren gemessen werden. Verfügbare Schweredaten aus der Geologie werden hingegen für die Bestimmung der Höhenbezugsfläche durchaus von uns genutzt.

Infolge der unregelmäßigen Dichte- bzw. Massenverteilung der Erde weist die mittlere Meeresoberfläche keine ideale, rein geometrisch definierte Form auf. Als mathematische Bezugsfläche sowie für Koordinatenberechnungen wird die Form der Erde als mittleres Erdellipsoid definiert. Dieses Ellipsoid ist ein im Vergleich zur Kugel an den Polen um ca. 22 km abgeplatteter rotations-symmetrischer Körper, was die tatsächliche Form der Erde schon recht gut annähert. Als Höhenbezugsfläche ist es für praktische Anwendungen jedoch ungeeignet. Global betrachtet weichen die Höhe des mittleren Meeresspiegels und unsere darauf bezogene Höhenbezugsfläche um immerhin bis zu $\pm 100 \text{ m}$ vom mittleren Erdellipsoid ab. Das mag in Anbetracht des Erdradius von rund 6370 km zunächst einmal nicht besonders spektakulär klingen. Allein in Deutschland variiert der Abstand zwischen Höhenbezugsfläche und Ellipsoid aber immerhin zwischen 34 m in der Ostsee und 50 m in den Alpen. Selbst in lokal begrenzten

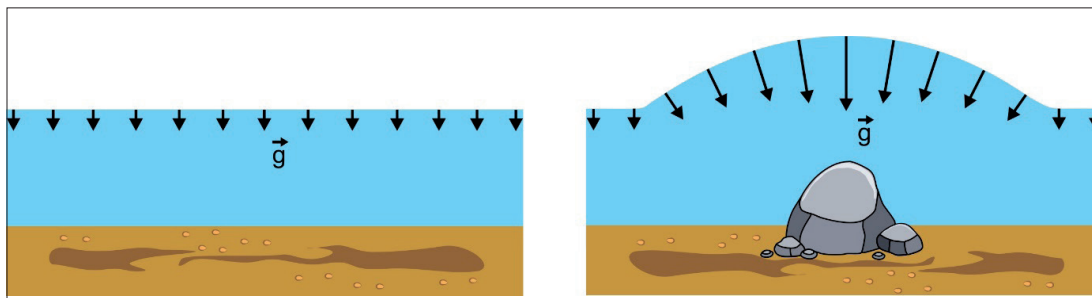


Abb. 4: Prinzipskizze zum Einfluss von Massenunregelmäßigkeiten auf das Schwerefeld der Erde (entnommen aus Fahrtbericht Deneb 2015)

Gebieten kann sich der Abstand zwischen Höhenbezugsfläche und Ellipsoid um bis zu 10 cm/km in den Gebirgen ändern. Diese Variationen übersteigen bei Weitem die üblichen Genauigkeitsanforderungen in der vermessungstechnischen Praxis.

Höhen über dem mittleren Erdellipsoid sind daher kein guter Ersatz für die tatsächliche Höhe über dem Meeresspiegel. Sie ermöglichen beispielsweise keine zuverlässige Angabe zur Fließrichtung des Wassers und sind ohne eine zusätzliche Korrektur für die meisten praktischen Anwendungen ungeeignet.

Ursache hierfür ist die schon erwähnte unregelmäßige Massenverteilung und die dadurch verursachte unterschiedliche Erdanziehungskraft, die den Meeresspiegel im wahrsten Sinne des Wortes verbeult. Gebiete mit höherer Schwerkraft ziehen das Wasser stärker an und erzeugen eine Beule (Abb. 4). Umgekehrt ziehen Gegenden mit geringerer Schwerkraft das Wasser weniger stark an, sodass eine Delle entsteht. Im Vergleich zu einer rein mathematisch definierten idealen Erdfigur weist die Meeresoberfläche deshalb »Berge« und »Täler« auf. Über den gesamten Bereich der deutschen Ostseegewässer betragen diese Unregelmäßigkeiten im Maximum bis zu 5,9 m, über der AWZ der Nordsee immerhin noch bis zu 3,9 m. Im Vergleich zur geforderten Genauigkeit der Tiefenangaben in den Seekarten kann dieser Einfluss nicht vernachlässigt werden. In stark überhöhtem Maßstab gleicht die Form der Erde eher einer Kartoffel mit Dellen und Beulen als einem ebenmäßigen Körper wie einer Kugel bzw. einem Ellipsoid.

Eine möglichst genaue Vermessung dieser Unregelmäßigkeiten im Erdschwerefeld (Anomalien) ist das Ziel unserer Reise mit dem VWFS *Deneb*. Auf ihrer Grundlage berechnen wir die nächste Version der Höhenbezugsfläche von Deutschland, das German Combined Quasigeoid 202x. Dieses Modell wird dann wieder etwas zuverlässiger sein als das derzeitige GCG2016 (BKG 2016; Schirmer et al. 2018) und den Nutzeranforderungen besser gerecht werden. Es wird am BSH und bei allen anderen Kunden im maritimen Umfeld eine genauere Umrechnung der von ihnen mittels globalem Navigations satellitensystem (GNSS) ermittelten ellipsoidischen Höhen in Höhen über

dem festgelegten Meeresspiegelniveau ermöglichen.

Wie ist es überhaupt möglich, auf einem »wackligen« Schiff so genaue Schweremessungen durchzuführen?

Wenn man eine Messgröße auf einen Millionstel Teil genau bestimmen will, braucht man schon recht sensitive Messgeräte. Gravimeter, mit denen die Schwerebeschleunigung bzw. deren Veränderungen bestimmt werden, gehören in jedem Fall dazu.

Üblicherweise müssen Gravimeter sehr genau horizontiert werden und auch die Temperatur in der Umgebung sollte sich nicht allzu schnell ändern. Für die Durchführung von Schweremessungen auf einem Schiff oder in einem Flugzeug werden deshalb besondere Messgeräte benötigt, über die das GFZ Potsdam und die TU Darmstadt verfügen (Abb. 5).



Abb. 5: Gravimetrisches Instrumentarium im Nasslabor an Bord des VWFS *Deneb*. Das Chekan-Gravimeter des GFZ Potsdam (Aufkleber) ist auf einer Grundplatte montiert, welche neben Steuergeräten auch das inertielle Messsystem der TU Darmstadt trägt. Rechts hinten befindet sich ein Rack mit dem Steuerrechner für das Chekan-Gravimeter, mit vier GNSS-Empfängern und zwei weiteren Computern. Das System ist für die dynamischen Bedingungen einer bewegten Messplattform (z. B. Flugzeug, Schiff) ausgelegt

© Christoph Förster, GFZ

Die Störbeschleunigungen aufgrund von Seegang, Wendemanövern und Ähnlichem, die von dem Messgerät aufgezeichnet werden, sind aber dennoch um ein Vielfaches größer als das zu messende Schweresignal. Ein Teil davon lässt sich modellieren (Coriolis- und Eötvös-Effekt aufgrund der Erdrotation) bzw. kann aus der zentimetergenauen GNSS-Trajektorie des Schiffes berechnet werden. Für die Eliminierung der seegangbedingten Störeinflüsse macht man sich den Sachverhalt zunutze, dass die schwerefeldbedingten Signalanteile eine ganz andere Wellenlänge haben als der Seegang. Mittelt man alle Messwerte in einem Zeitfenster von z. B. zehn Minuten, kann der Einfluss des Seegangs auf die Messung praktisch eliminiert werden, da in diesem Zeitraum schon recht viele Wellenberge und -täler erfasst wurden. Da das VWFS *Deneb* die Messprofile mit einer Geschwindigkeit von ca. 10 Knoten (rund 18 km/h) abfährt, hat es in dieser Zeit eine Strecke von etwa 3 km zurückgelegt. Über diese Entfernung hat sich die zu bestimmende Schwerebeschleunigung aber nur relativ wenig geändert und kann im Verhältnis zur Messgenauigkeit des Gravimeters mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden.

Wurden noch andere Messungen durchgeführt?

Wir haben die Gelegenheit genutzt und das VWFS *Deneb* für diese Fahrt mit weiterer Sensorik ausgerüstet. Wir wollten testen, wie genau man die Meeresspiegelhöhe während der Fahrt messen kann. Diese Arbeiten ordnen sich in einen neuen Arbeitsschwerpunkt im Referat G 3 des BKG ein, mit dem im letzten Jahr begonnen wurde: die Bestimmung des Meeresspiegels und des Meeresspiegelanstieges in Nord- und Ostsee.

Das grundlegende Messverfahren, das wir dazu am BKG nutzen, ist die Satellitenaltimetrie (Abdalla et al. 2021). Altimetersatelliten fliegen auf »festen« Spuren über der Erde und überfliegen dasselbe Gebiet in regelmäßigen Zeitabständen. Je nach Satellitenmission können das zehn und mehr Tage sein. Satellitenmissionen, die die Meereshöhe in regelmäßigen Abständen mit Zentimetergenauigkeit vermessen können, gibt es nunmehr seit ca. 30 Jahren, das heißt, man kann auf ihrer Grundlage den Meeresspiegelanstieg der letzten 30 Jahre berechnen.

Darüber hinaus gibt es natürlich noch punktweise Pegelmessungen. Aufzeichnungen einiger Pegel reichen bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück. Pegel messen per se an der Küste die Höhe des Meeresspiegels gegenüber dem Festland. Altimetersatelliten liefern genaue Messungen von Höhen über dem oben erwähnten idealen Erdellipsoid über dem offenen Meer. In Küstennähe sind sie jedoch durch Festlandeinflüsse verfälscht und liefern gerade hier keine genauen Messwerte.

Meeresspiegelhöhen von Pegeln und Altimetersatelliten können deshalb nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. Es werden zusätzliche Informationen benötigt, beispielsweise aus Ozeanmodellen abgeleitete Meereshöhen. Hier können wir die Ergebnisse von Modellsimulationen nutzen, die uns vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) zur Verfügung gestellt werden (Burchard und Bolding Kristensen 2002; Gräwe et al. 2019). Unser Ziel ist es, diese Informationen optimal miteinander zu verknüpfen. Denn alle Messverfahren und Modelle haben spezifische Eigenschaften, Vor- und Nachteile. Sei es bezüglich der räumlichen Verteilung der Daten, der zeitlichen Auflösung (Messintervall), der physikalischen Interpretierbarkeit oder des Messfehlers.

Alles in allem ist dies eine komplexe Aufgabe. Zusätzliche Informationen, wie die Meereshöhen entlang des Schiffstracks, könnten dabei eine wertvolle Hilfe sein. Wenn der Meeresspiegelanstieg von wenigen Millimetern pro Jahr bestimmt werden soll, stellt dies höchste Ansprüche an die Messungen und Modelle sowie an die Qualität und Homogenität des zugrunde liegenden geodätischen Raumbezuges.

Worauf kommt es bei der Planung der Messprofile an?

Ein Kriterium bei der Planung der Messprofile war deshalb der Verlauf der Subsatellitenspuren, das heißt der Linien auf der Erdoberfläche, die die Altimetersatelliten regelmäßig überfliegen (Abb. 6). Zweimal im Verlauf der Fahrt waren wir auch gerade zeitgleich mit dem Satelliten auf diesen Spuren unterwegs, sodass wir unsere Messungen unmittelbar mit den Satellitenmessungen vergleichen können.

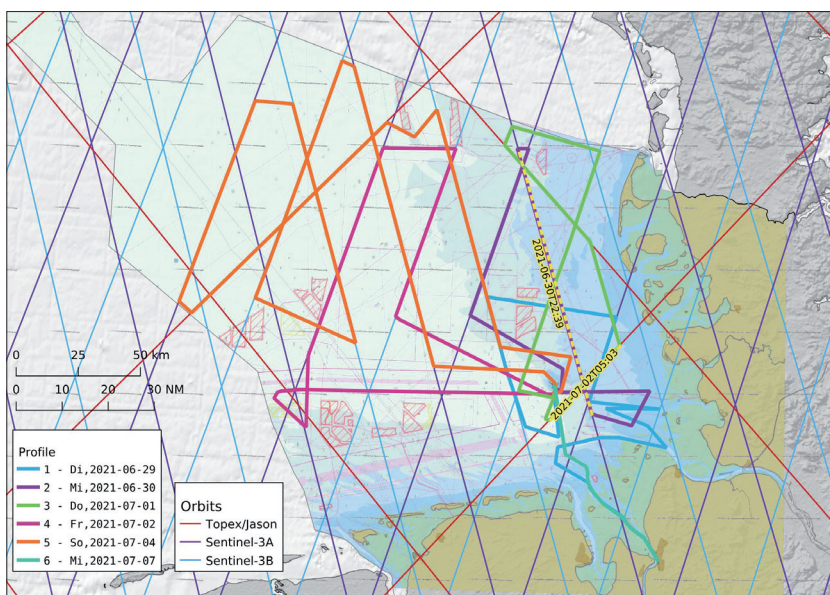


Abb. 6: Seekarte der deutschen Nordseeküste mit Einschränkungen für den Schiffsverkehr (Violett: Verkehrstrennungsgebiete, schraffierte Polygone: Windparks) und Altimeterorbits

Bei der Planung der gesamten Fahrt sind aber noch viele andere Aspekte zu berücksichtigen. Neben der Position und der Orientierung der älteren Schweremessprofile sind das in erster Linie natürlich die festgeschriebenen Schifffahrtsregeln. Auch wenn sie für den Laien nicht erkennbar sind, gibt es ausgewiesene Schifffahrtswege zu den großen Häfen, und nicht alle Meeresbereiche dürfen in beliebiger Richtung befahren werden. Hier geht es eher wie auf einer Autobahn zu, es gibt ausgewiesene Fahrrichtungen und als Mittelleitplanken dienen sogenannte Verkehrstrennungsgelände. Auch ein amtliches Vermessungsschiff darf nicht ohne triftigen Grund gegen diese Regeln verstoßen, zumal wir für unsere Messungen besondere Anforderungen an die Tracks stellen. Für unsere Messungen ist es vorteilhaft, wenn die Profile möglichst lang und geradlinig sind sowie mit konstanter Geschwindigkeit gefahren werden. Unter diesen Bedingungen ist eine »wilde« Querung von viel befahrenen Schifffahrtswegen, wie z. B. der Ansteuerung zur Elbe nach Hamburg, quasi nicht planbar (Abb. 6).

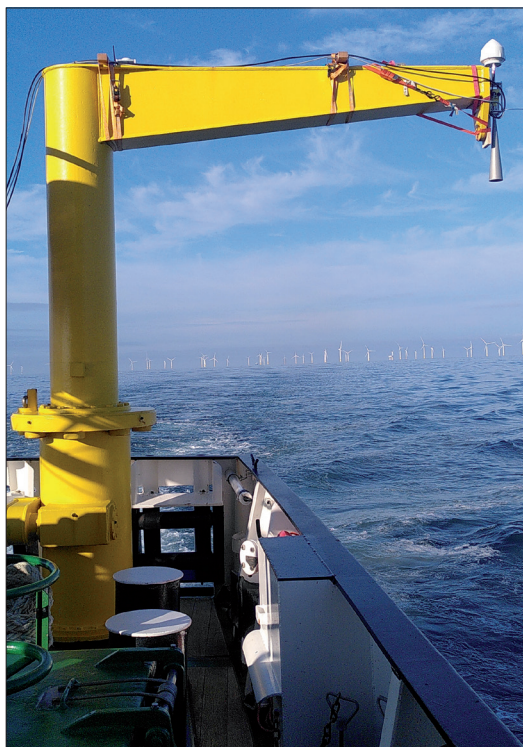
Vor, aber vor allem auch während der Fahrt ist uns zudem die Anzahl bereits vorhandener Windparks in der Nordsee deutlich bewusst geworden (Abb. 6 und Abb. 7). Weitere Windparks, die in der nächsten Zeit entstehen sollen, sind bereits ausgewiesen.

Welche Geräte wurden an Bord installiert?

Für die Bestimmung der Meereshöhen wurden an Bord des VWFS *Deneb* weitere GNSS-Ausrüstung sowie ein Radarpegel installiert (Abb. 7). Eine Satellitenkommunikationsanlage zur Datenübertragung und einen weiteren GNSS-Empfänger hatten wir bereits im Rahmen des FAMOS-Projektes installiert. Zur Bestimmung der Schiffsneigung und des Kurses haben wir einen speziellen GNSS-Empfänger betrieben, an den vier GNSS-Antennen angeschlossen werden können. Daneben zeichnet das VWFS *Deneb* selbst natürlich jede Menge Daten auf, die wir nutzen können.

Die Fahrt beginnt für uns deshalb nicht erst mit dem Ablegen des Schiffes. Bereits vier Tage vor Abfahrt sind wir mit sechs Kollegen in Bremerhaven eingetroffen und haben das gesamte Equipment installiert. Alle Antennen und Messgeräte mussten befestigt, Antennen- und Datenkabel an Bord verlegt und die Funktion der Geräte getestet werden. Die Position der Gravimeter, aller Antennen und des Radarpegels wurde im schiffseigenen Koordinatensystem eingemessen.

Die Grundlagen für den Erfolg einer Messkampagne werden aber noch früher gelegt. Ohne die vorherige sorgfältige Zusammenstellung und den Test aller Messgeräte, die Planung der Messprofile, die Beantragung von Messgenehmigungen über das Auswärtige Amt bei Fahrten in ausländischen



© Ludwig Schröder, BKG

Abb. 7: Speziell zur Messung der Meereshöhe installierte GNSS-Antenne und Radarpegel auf dem Schleppdavit am Achterdeck der *Deneb*. Im Hintergrund ist einer der zahlreichen Windparks zu erkennen

Gewässern etc. würde es während der Fahrt ziemlich chaotisch zugehen.

... und läuft denn immer alles nach Plan?

Unvorhersehbare Ereignisse gibt es während einer Messfahrt ohnehin genug. Die Wetterbedingungen sind nur ein naheliegendes Beispiel, warum die Fahrtplanung von Tag zu Tag den aktuellen Gegebenheiten angepasst werden muss. Zwar könnte das VWFS *Deneb* auch bei Windstärke 7 noch sicher fahren, der dadurch verursachte Seegang führt aber zu stärkeren Roll- und Stampfbewegungen des Schiffes. Die Brecher spritzen dann schon mal bis auf die Höhe der Brücke und sind im ganzen Schiffskörper deutlich zu hören und zu spüren. Spätestens diese Bedingungen sind der Qualität der Schweremessungen abträglich, sodass Messungen unter diesen Bedingungen nicht nur für Schiff und Besatzung eine zusätzliche Belastung darstellen, sondern auch wenig Sinn haben. In diesen Fällen heißt es also abwettern und Schutz suchen: im Hafen, unter Land oder zumindest durch das kontrollierte Driften auf einem geeigneten Kurs.

Unvorhersehbares kann uns aber nicht nur das Wetter bescheren. Die Qualität der Messungen hängt maßgeblich vom sogenannten Gangverhalten des Gravimeters ab, das wir ständig überwachen müssen. Den Gang eines Gravimeters kann man sich in Analogie zum Gang bei einer älteren

mechanischen Uhr vorstellen. Solange eine Uhr gleichmäßig vor- oder nachgeht und man den täglichen Uhrengang kennt, kann man leicht auf die korrekte Uhrzeit schließen. Um den Gang des Gravimeters zu bestimmen, machen wir mindestens jeden zweiten Tag für einige Stunden im Hafen von Helgoland fest und führen Vergleichsmessungen neben einem Punkt durch, dessen Schwere wert bereits bekannt ist. Diese Vergleichspunkte wurden im Vorfeld extra für diese Fahrt vom BKG unmittelbar an den Liegeplätzen des VWFS *Deneb* in Bremerhaven und Helgoland angelegt.

In Helgoland warten auch zwei Kollegen von uns, die die Messdaten übernehmen und erste Analysen und Vergleiche mit den Altdaten durchführen. Pandemiebedingt können sie dieses Mal leider nicht auf dem VWFS *Deneb* mitfahren. Auch an Bord werden jede Menge Programme und Skripte geschrieben, um die Vollständigkeit und Plausibilität der Daten zu prüfen und erste Vergleiche der Sensoren untereinander durchzuführen. Dieses Mal weist das Gravimeter ein hinreichend stabiles Gangverhalten auf. Bei früheren Fahrten war dies nicht immer der Fall und wir mussten den Fahrtverlauf daraufhin anpassen. Die primäre Datenanalyse vor Ort ist deshalb eine wichtige Voraussetzung für die Qualitätssicherung der gewonnenen Messdaten.

Wie geht es nun weiter?

Im deutschen Anteil der Ostsee sind die gravimetrischen Messungen abgeschlossen und zum Teil bereits in das German Combined Quasigeoid 2016 (GCG2016), das bisher auch als Seekartennull in der Ostsee fungiert, eingeflossen. In unseren Nachbarländern werden zum Teil noch weitere Messungen durchgeführt, sodass insgesamt in weiten Teilen der Ostsee aktualisierte Schwere werte zur Verfügung stehen werden (Abb. 8). Sie sind die Grundlage, um ein neues einheitliches Geoidmodell für die gesamte Ostsee zu berechnen. Die Standards, auf deren Grundlage diese Berechnung erfolgt, wurden bereits 2016 festgelegt (Ågren et al. 2016, aktualisiert 2021). Dieses Modell wird den Namen Baltic Sea Chart Datum 2000 (BSCD2000; Schwabe et al. 2020) haben. An seiner Berechnung beteiligen sich mehrere Rechenzentren, neben dem BKG auch Lantmäteriet (Schweden), Tallinn University of Technology (TalTech, Estland), Finnish Geodetic Institute (FGI, Finnland) und DTU Space (Dänemark). Nach dem Auslaufen des FAMOS-Projektes werden die Arbeiten im Rahmen der Chart Datum Working Group (CDWG; www.bshc.pro/working-groups/cdwg) der Baltic Sea Hydrographic Commission (BSHC) der International Hydrographic Organization (IHO) koordiniert. Die finale Berechnung des Modells soll 2022 erfolgen. Es wird von allen Ostseerainern (Status in Russland ist nicht bekannt) offiziell akzeptiert und eingeführt. Die administrativen Anforderungen in Deutschland wurden hierfür bereits gelegt, mit Wirkung vom 04.08.2021 ist BSCD2000DHHN2016 das offizielle Seekartennull für die Ostsee in Deutschland. Auf die Navigation hat dies keine Auswirkungen, die Tiefen in den Seekarten des BSH ändern sich nicht.

In der Nordsee werden sich die Arbeiten noch etwas länger hinziehen. Derzeitig werden die an Bord erhobenen Messungen ausgewertet und anschließend die älteren Schweredaten kontrolliert. Für 2022 ist bereits die nächste Fahrt zur Durchführung von Schweremessungen in der Nordsee geplant. Sobald die notwendige substanzielle Verbesserung der Datenbasis erreicht wird, kann auch für die Nordsee das German Combined Quasigeoid aktualisiert werden. Gemeinsam mit den absehbaren Entwicklungen im GNSS-Bereich, z. B. Positionierungsdiensten auf der Grundlage des Precise Point Positioning, wird die Höhenbestimmung im Meeresbereich der Nord- und Ostsee dann wieder ein Stück genauer, zuverlässiger und operationeller. Von den verbesserten geodätischen Grundlagen und Positionierungsmöglichkeiten wird nicht nur die Seevermessung selbst profitieren. Die verbesserte geodätische Infrastruktur wird auch positive Auswirkungen in anderen Anwendungsbereichen, wie Verkehr, Umwelt oder bei den Untersuchungen der Meeresspiegeländerungen, haben.

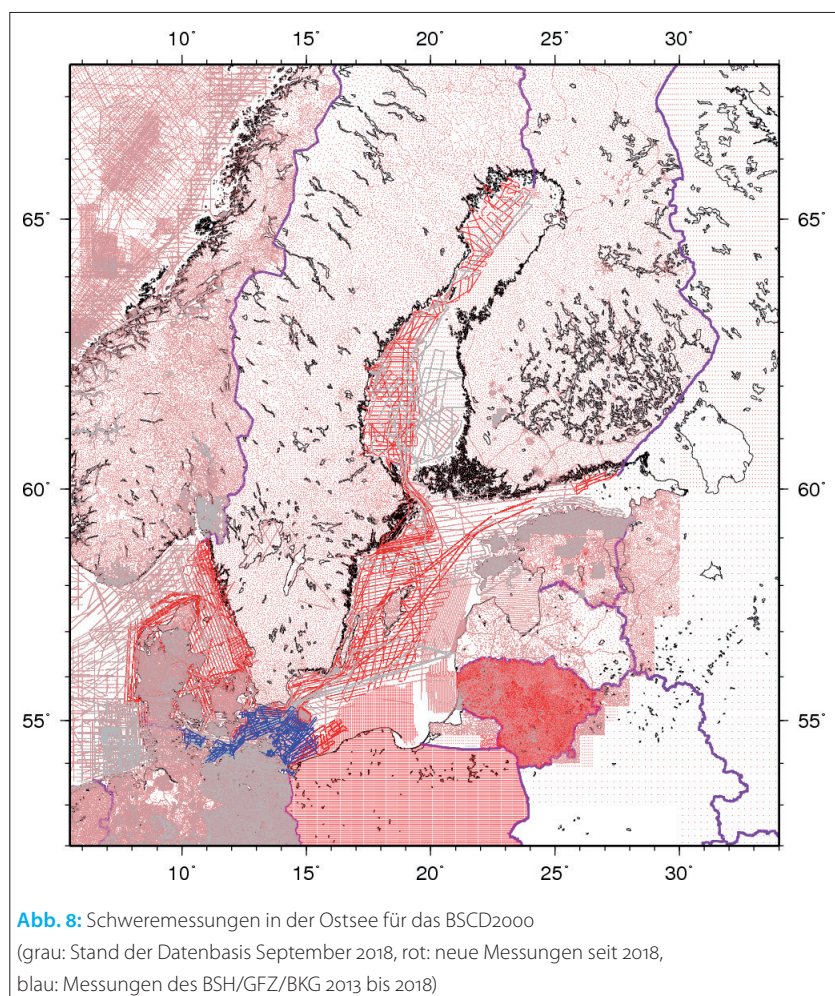


Abb. 8: Schweremessungen in der Ostsee für das BSCD2000 (grau: Stand der Datenbasis September 2018, rot: neue Messungen seit 2018, blau: Messungen des BSH/GFZ/BKG 2013 bis 2018)

Dank

Ohne eine breite Unterstützung ist die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung einer Vermessungsfahrt nicht möglich. Hierzu sind weit mehr Kolleginnen und Kollegen notwendig, als die vier Gäste, die dieses Mal an Bord des VWFS *Deneb* mitfahren konnten. Hierzu zählen natürlich Kapitän Andreas Gentes und die Besatzung des VWFS *Deneb*, die uns bei allen Anliegen tatkräftig unterstützt haben. Die gesamte Atmosphäre an Bord war auch dieses Mal wieder sehr angenehm und ausgesprochen freundlich, sodass wir uns an Bord wieder sehr wohlfühlt haben. Unser Dank gilt aber auch Cindy Niemeyer vom BSH sowie al-

len beteiligten Kolleginnen und Kollegen der Referate »Seevermessung und Geodäsie« und »Schiffe und Geräte«, die diese Fahrt seitens des BSH bestens organisiert und vorbereitet haben.

Vom BKG haben uns zahlreiche Kollegen unterstützt, bei

- der Installation der Technik (Stefan Friedländer, Sebastian Knappe, Elke Kühmstedt),
 - der Einmessung der Sensoren an Bord des VWFS *Deneb* (Christian Lewerenz und Mario Langhammer),
 - der Bestimmung der gravimetrischen Anschlusspunkte (Andreas Reinhold und Axel Rülke).
- Vielen Dank an alle Kolleginnen und Kollegen. //

Literatur

- Abdalla, Saleh; Abdolnabi Abdeh Kolahchi et al. (2021): Altimetry for the future: Building on 25 years of progress. *Advances in Space Research*, DOI: 10.1016/j.asr.2021.01.022
- Ågren, Jonas; Gunter Liebsch; Jyrki Mononen (2016, aktualisiert 2021): Specification of the Baltic Sea Chart Datum 2000 (BSCD2000). Version 5b, 21.09.2021. www.bshc.pro/media/documents/CDWG/CDWG+Specification+of+the+Baltic+Sea+Chart+Datum+2000.pdf (zuletzt abgerufen am 28.09.2021)
- BKG (2015): BKG-Jahresbericht 2014. www.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/BKG/DE/Downloads-Jahresberichte/BKG-Jahresbericht-2014-DE.pdf (zuletzt abgerufen am 28.09.2021)
- BKG (2016): Metadatenatz GCG2016. <https://mis.bkg.bund.de/trefferanzeige?docuuid=983fac52-b7de-4f43-a6f5-91e007a6f963>
- BKG (2018): Metadatenatz DGM25. <https://mis.bkg.bund.de/trefferanzeige?docuuid=dcf869ba-458e-487b-a856-1038eb9c48af>
- BKG/GFZ/BSH (2016): »Berge und Täler« der Ostsee – EU-Projekt FAMOS: Forschungsschiff DENEb vermisst Meeresspiegel. Gemeinsame Pressemitteilung vom 20.05.2016. www.bkg.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BKG/DE/PM_Download_Link/160520-DENEb.pdf (zuletzt abgerufen am 28.09.2021)
- Burchard Hans; Karsten Bolding Kristensen (2002): GETM, a General Estuarine Transport Model. EUR 20253 EN. European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC23237>
- GEBCO Compilation Group (2021): GEBCO 2021 Grid. DOI: 10.5285/c6612cbe-50b3-ocff-e053-6c86abc09f8f
- IHO (2018): Resolutions of the International Hydrographic Organization – Publication M-3, 2nd Edition – 2010, Updated to August 2018. International Hydrographic Organization, Monaco 2018, https://iho.int/iho_pubs/misc/M3-E-AUGUST18.pdf (zuletzt abgerufen am 28.09.2021)
- Lu, Bingan; Franz Barthelmes et al. (2019): Shipborne gravimetry in the Baltic Sea: data processing strategies, crucial findings and preliminary geoid determination tests. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-018-01225-7
- Pail, Roland; Sean Bruinsma et al. (2011): First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-011-0467-x
- Schäfer, Uwe; Franz Barthelmes et al. (2013): A ship-borne gravity campaign of the Bodensee (Lake Costance) – Motivation, design and first results. *Proceedings, IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (Sankt Petersburg)*, https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_352614
- Schirmer, Uwe; Joachim Schwabe et al. (2018): Modellierung des Quasigeoides GCG2016. In: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitskreis Raumbezug (Hrsg.): DHHN2016 – Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016, DOI: 10.5675/Raumbezug_2016_Hauptdokument, S. 197–225
- Gräwe, Ulf; Knut Klingbeil et al. (2019): Decomposing Mean Sea Level Rise in a Semi-Enclosed Basin, the Baltic Sea. *Journal of Climate*, DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0174.1
- Schwabe, Joachim; Jonas Ågren et al. (2020): The Baltic Sea Chart Datum 2000 (BSCD2000). Implementation of a common reference level in the Baltic Sea. *International Hydrographic Review*, https://iho.int/uploads/user/pubs/ihreview_P1/IHR_May2020.pdf (zuletzt abgerufen am 28.09.2021)